

Глава VI.

Электромагнитные волны

§6. Электродинамика Максвелла.

Более 150 лет назад появились первые работы Максвелла, в которых на математическом языке развивались идеи Фарадея о роли промежуточной среды в электромагнитных процессах. Существовавшая до этого времени электродинамика Кулона-Ампера-Вебера была по сути дела, теорией, основанной на принципе дальнего действия. Теория же Фарадея-Максвелла опиралась на принцип близкого действия.

Введение тока смещения позволило Максвеллу предсказать существование электромагнитных волн и показать, что световые волны являются частным случаем электромагнитных волн. Теория Максвелла отвергалась физиками. Молодой физик Г.Герц даже получил тему магистерской диссертации: опровергнуть теорию Максвелла. Максвелл не дожил до своего триумфа (он умер в 1879 году), когда Г.Герц в 1887 году экспериментально обнаружил электромагнитные волны (одно из принципиальных предсказаний новой теории) и стал апологетом электродинамики Максвелла. Он придал ей тот математический вид, которым мы пользуемся сегодня, опираясь на элементы векторной алгебры и анализа.

И в теории Фарадея-Максвелла и в работах Герца электромагнитные процессы протекали в специфической среде - эфире (сначала это были электромагнитный и световой эфиры, а затем, после утверждения, что свет - это электромагнитные волны, единый электро-магнитный эфир). Более подробно об эфире говорится в разделе "Специальная теория относительности", сейчас же заметим, что в СТО А.Эйнштейн отказался от эфира и признал за электромагнитным полем вид материи.

Так с 1905 года в физике и в философии рассматриваются два вида материи. Открытое в 1932 году явление "аннигиляции" (лучше сказать, явление взаимопревращения частиц вещества и электромагнитного поля) показало их неразрывную связь.

Одним из ограничений электродинамики Максвелла является то, что она не учитывает атомарного строения вещества, а также квантовых свойств излучения. Именно поэтому электродинамика Максвелла не могла объяснить явление дисперсии и эффекты нелинейной оптики, а открытое Герцем явление фотоэффекта потребовало применения элементов квантовой физики.

Вместе с тем, в широком круге явлений (кроме указанных выше и некоторых других)' электродинамика Максвелла не потеряла своего значения и является классическим примером построения феноменологической, макроскопической теории.

§6.1. Плоские электромагнитные волны.

Задача №25

Плоская электромагнитная волна, у которой

$$E_x = E_z = H_x = H_y = 0, \quad E_y = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_z = a \sin 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{c} \right), \text{ падает при}$$

$x = 0$ на нормальную к оси OX плоскую поверхность проводника, простирающегося вправо до бесконечности. Пренебрегая отражением, определить производимое электромагнитной волной давление.

Исторические замечания.

Еще в теории Максвелла было предсказано световое давление. Наш соотечественник московский физик П.Н.Лебедев экспериментально (в 1899 году) доказал, что свет обладает количеством движения и может оказывать механическое действие (давление) и тем самым ещё раз доказал верность электродинамики Максвелла.

Так что данная задача является теорией исторического опыта.

Запишем условие задачи кратко.

Найти	P
Дано	$E_x = E_z = H_x = H_y = 0$ $E_y = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_z = a \sin 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{c} \right)$ $x \geq 0$

Решение

Свяжем СО с проводящей средой. Ось OX направим внутрь проводника, начало координат расположим на поверхности проводника. Система координат - праввинтовая.

Сделаем чертёж.

Так как проводящая среда полностью поглощает энергию электромагнитной волны, то поверхность проводящей среды можно рассматривать как «абсолютно чёрную» поверхность. Величина давления оп-

ределится равенством $p = \frac{\bar{S}_{x=0}}{c}$, где $\bar{S}_{x=0}$ - среднее за период волны значение вектора Умова - Пойнтинга при $x=0$.

Учитывая, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ взаимно перпендикулярны и что $\vec{S}$ по модулю равен:

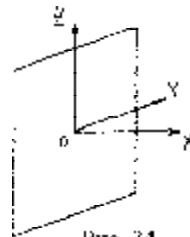


Рис. 34

$S = E_y H_z = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} a^2 \cdot \sin^2 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{c} \right)$, рассчитаем среднее значение $\bar{S}$ при

$x = 0$ за период по формуле $\bar{S}_{x=0} = \frac{1}{T} \int_0^T S_{x=0} dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} a^2$.

Тогда $p = \frac{1}{2c} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} a^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 a^2$, где использовано выражение

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Задача №26

Показать, что в идеальный проводник ($\sigma = \infty$) электромагнитная волна не проникает.

Запишем условие задачи кратко.

Решение

Свяжем систему отсчёта с проводником.

Воспользуемся 8-ым уравнением Максвелла (при $\mathbf{E}^{cmp} = 0$): $\mathbf{j}_2 = \sigma_2 \mathbf{E}_2$.

В силу конечности величины $\mathbf{j}_2$ и принятой нами бесконечной проводимости проводника это равенство будет выполняться лишь при условии, что $\mathbf{E}_2 \equiv 0$.

Второе уравнение Максвелла-
 $\text{rot} \mathbf{E}_2 = -\frac{\partial \mathbf{B}_2}{\partial t}$ также будет выполняться тождественно, если $\mathbf{B}_2 \equiv 0$.

Действительно, если

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_{02} e^{i\omega t} \text{ то } \frac{\partial \mathbf{B}_2}{\partial t} = i\omega \mathbf{B}_{02} e^{i\omega t} = i\omega \mathbf{B}_2.$$

Итак, $\text{rot} \mathbf{E}_2 = -i\omega \mathbf{B}_2$, откуда $\mathbf{B}_2 \equiv 0$. Поля внутри проводника нет.